ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY





УДК 669.716
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-78-87

Оригинальное эмпирическое исследование

Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства крупногабаритных изделий перспективной авиационной техники из сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu



EDN: NTBOKI

В.С. Муратов[1], **Н.С. Якимов**[2] ✉
[1]Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
[2]АО «Авиаагрегат», г. Самара, Российская Федерация
✉ andrej.bakin2013@yandex.ru

Аннотация

Введение. Высокопрочные сплавы на алюминиевой основе системы легирования Al-Zn-Mg-Cu широко используются для изготовления деталей авиационной техники. Требует решения проблема достижения необходимого уровня механических свойств крупногабаритных деталей из сплавов этой системы легирования при термической обработке. Актуальны также исследования по оценке особенностей формирования коррозионных свойств в процессе реализации операций термической обработки. Цель данной работы — определить режимы термической обработки для достижения необходимых значений механических свойств и стойкости к коррозионному растрескиванию деталей из крупногабаритных деформированных заготовок сплавов системы легирования Al-Zn-Mg-Cu.

Материалы и методы. Исследования выполнены на деталях, изготавливаемых из поковок сплава 1933 и штампованных заготовок сплава В93пч. Определялось влияние режимов термической обработки на комплекс механических свойств (характеристики прочности, пластичности, твердости), микроструктуру и электропроводность сплавов. Испытания на растяжение реализовывались как на образцах, подвергнутых термической обработке после вырезки из поковок и штампованных заготовок, так и на образцах, вырезанных из массивных темплетов, которые подвергались термической обработке вместе с изделиями. Электропроводность позволяла оценивать степень пересыщенности твердого раствора и прогнозировать сопротивляемость сплава коррозионному растрескиванию.

Результаты исследования. Показана необходимость дифференцированного подхода к назначению длительности ступеней старения в зависимости от марки сплава, конфигурации и габаритов изделий, требований к уровню свойств. Предложены варианты и режимы термической обработки для изделий из сплавов 1933 и В93пч, обеспечивающие необходимый уровень механических свойств и сопротивляемости коррозионному растрескиванию.

Обсуждение и заключение. Установлены случаи несоответствия прочностных свойств в продольном и поперечном (по ширине) направлениях волокна деталей, изготавливаемых из крупногабаритных заготовок сплавов 1933 и В93пч. Предложены режимы и варианты термической обработки деталей, позволяющие достигать требуемых значений механических свойств и коррозионной стойкости, которые предусматривают сокращение в два раза (для сплава 1933) или увеличение на 25 % (для сплава В95пч) времени выдержки при ступенях старения.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, крупногабаритные изделия, термическая обработка, структура, свойства

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, устранение которых позволило повысить ее качество.

Для цитирования. Муратов В.С., Якимов Н.С. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства крупногабаритных изделий перспективной авиационной техники из сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(3):78–87. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-78-87

Original Empirical Research

Influence of Heat Treatment Modes on the Structure and Properties of Large-Sized Products of Advanced Aviation Equipment Made of Alloys of the Al-Zn-Mg-Cu System

Vladimir S. Muratov[1], **Nikolai S. Yakimov**[2] ✉
[1]Samata State Technical University, Samara, Russian Federation
[2]Aviaagregat JSC, Samara, Russian Federation
✉ andrej.bakin2013@yandex.ru

Abstract

Introduction. High-strength aluminum-based alloys of the Al-Zn-Mg-Cu alloying system are commonly used in aircraft manufacturing. However, there is a need to address the issue of achieving the desired level of mechanical properties in large-scale parts made from these alloys during heat treatment. Additionally, studies on the evaluation of corrosion resistance during heat treatment are also essential. The aim of this work was to determine the modes of heat treatment to achieve the necessary values of mechanical properties and resistance to corrosion cracking of parts made of large-sized deformed blanks of alloys of the Al-Zn-Mg-Cu alloying system.

Materials and Methods. The research was conducted on parts made from forged 1933 alloy forgings and B93pch stamped blanks. The influence of heat treatment on the mechanical properties (strength, ductility, hardness) and microstructure, as well as electrical conductivity, was determined. Tensile tests were carried out both on samples subjected to heat treatment after cutting from forgings and stamped blanks, and on samples cut from massive templets that were heat treated together with the products. Electrical conductivity allowed us to assess the level of solid solution supersaturation and predict resistance to corrosion cracking.

Results. The results of the study showed the necessity of a differentiated approach to assigning the duration of aging stages, depending on the alloy grade, configuration, and dimensions of the products, as well as the requirements for the level of properties. Variants and modes of heat treatment were proposed for products made from alloys 1933 and B93pch, providing the necessary level of mechanical properties and resistance to corrosion cracking.

Discussion and Conclusion. Cases of inconsistency in strength properties in the longitudinal and transverse (in width) directions of the fiber of parts made from large-sized blanks of alloys 1933 and B93pch have been established. Modes and options for heat treatment of parts were proposed, allowing the achievement of the required values of mechanical properties and corrosion resistance. This provides for a halving of the aging time for alloy 1933 or an increase of 25% for alloy B95pch.

Keywords: aluminum alloys, large-sized products, heat treatment, structure, properties

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial team of the Journal and anonymous reviewers for their competent expertise and valuable recommendations for improving the quality of the article.

For citation. Muratov VS, Yakimov NS. Influence of Heat Treatment Modes on the Structure and Properties of Large-Sized Products of Advanced Aviation Equipment Made of Alloys of the Al-Zn-Mg-Cu System. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(3):78–87. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-78-87

Введение. При изготовлении модернизированных и перспективных образцов самолетов и вертолетов нового поколения прежде всего должны учитываться показатели надежности и безопасности полетов и перевозок [1], а также снижение массы изделия [2], для чего необходимо применение сплавов, обладающих высокой прочностью [3], сопротивлением усталости [4], вязкостью разрушения [5], стойкостью к коррозии [6]. В последние годы для производства новых перспективных гражданских самолетов SSJ-NEW, МС-21, Ту-214, Ил-96 и др. широко используются высокопрочные алюминиевые сплавы, в частности сплавы 1933 и В93пч. Они предназначены для изготовления ответственных силовых деталей самолета — рам, траверс, фитингов, тяг, шпангоутов, корпусов, лонжеронов [7]. Алюминиевые высокопрочные сплавы [8] системы легирования Al-Zn-Mg-Cu [9] являются одними из основных конструкционных материалов [10] для изготовления авиационной техники [11]. В эту группу входят сплавы марок В93 [12], В93пч [13], В95 [14], В95оч [15], В95пч [16], 1933. Сплав 1933 является модификацией сплава В93, не отличаясь от В93 по содержанию основных компонентов, сплав 1933 содержит добавку 0,12 % Zr вместо Fe. Такое изменение состава обеспечивает более высокие прочность, вязкость разрушения и сопротивление усталости, но сплав 1933 обладает более низкой прокаливаемостью, чем сплав В93 [17].

Одной из проблем успешной эксплуатации изделий из сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu является обеспечение достаточной коррозионной стойкости. Анализ процессов коррозионной повреждаемости алюминиевых сплавов показывает, что развитие разрушения в структуре при основных механизмах коррозии — коррозионном растрескивании (КР) и межкристаллитной повреждаемости — протекает идентично. Следует учитывать, что КР

присуще преимущественно дисперсионно-твердеющим сплавам на алюминиевой основе. Для сплавов, которым свойственна пониженная пересыщенность твердого раствора, КР не свойственно. Чувствительность к КР сплавов [15] определенной системы легирования зависит от количества легирующих элементов [17].

Подверженность алюминиевых сплавов КР надежно коррелирует со степенью пересыщенности твердых растворов и существенно меньше зависит от электронной концентрации и неоднородности электрохимического потенциала, которая возникает при распаде пересыщенных твердых растворов. Процесс замедленного разрушения, протекающий в слабоагрессивных средах (например, в воздухе, имеющем относительную влажность около 50 %), развивается при достаточно высоких значениях атомной концентрации элементов, используемых для легирования. Сплавы алюминия системы легирования Al-Zn-Mg-Cu имеют 10 балл КР, что означает коррозионную повреждаемость в слабо агрессивных средах на ненадрезанных образцах. При этом основным способом повышения стойкости к опасным видам коррозии является разработка и внедрение ступенчатых режимов смягчающего старения (Т2, Т3)[1].

Согласно [18], для алюминиевых сплавов, упрочняемых при термической обработке, получены надежные корреляционные связи показателей механических свойств (пределов текучести $\sigma_{0,2}$ и прочности $\sigma_в$, относительное удлинение δ) и значений удельной электрической проводимости γ. Выявлено, что у таких сплавов с уменьшением удельной электрической проводимости повышается прочность и уменьшается пластичность. Следует иметь в виду, что значения электрических свойств определяются не только химическим составом сплавов, но и особенностями состояния структуры кристаллической решетки, которые формируются режимами деформационной и термической обработок. Все отмеченное позволяет проводить оценку коррозионной стойкости по значениям электропроводности.

Существует проблема формирования заданных свойств крупногабаритных деталей из сплавов 1933 и В93пч, используемых для самолетов SSJ-NEW и Ту-214, после термической обработки. Необходимы также исследования по оценке особенностей формирования уровня механических и коррозионных свойств ответственных силовых деталей в процессе реализации операций термической обработки.

Цель авторов данной статьи — определить режимы термической обработки для достижения необходимых значений механических свойств и стойкости к коррозионному растрескиванию деталей из крупногабаритных деформированных заготовок сплавов системы легирования Al-Zn-Mg-Cu.

Материалы и методы. Исследования выполнены на деталях, изготовленных из крупногабаритных поковок сплава 1933, произведенных на Каменск-Уральском металлургическом заводе, и штампованных заготовок из сплава В93пч, произведенных на предприятии «Арконик СМЗ» (г. Самара). Габариты поковок представлены на рис. 1, габаритные размеры штампованных заготовок — 1790х980 мм. Химический состав исследуемых сплавов представлен в таблице 1.

Термическая обработка изделий проводилась в электрических печах ПА-56 и ПА-54, микроструктурные исследования выполнялись на световом микроскопе Olympus GX71, измерения электропроводности проводились прибором «Константа К6». Испытания механических свойств осуществлялись по ГОСТ 1497–84. Образцы для испытаний изготавливались из темплетов (вырезанных из заготовок) размеров 70×70×140 мм, которые подвергались термической обработке вместе с изделиями. Использовались пропорциональные цилиндрические образцы типа Ш с начальным диаметром 5 мм или 15 мм. Испытания образцов на растяжение выполнялись на установке ГУРМ-20. Для определения твердости был использован метод Бринелля (ГОСТ 9012–9, ИСО 410–82)[2].

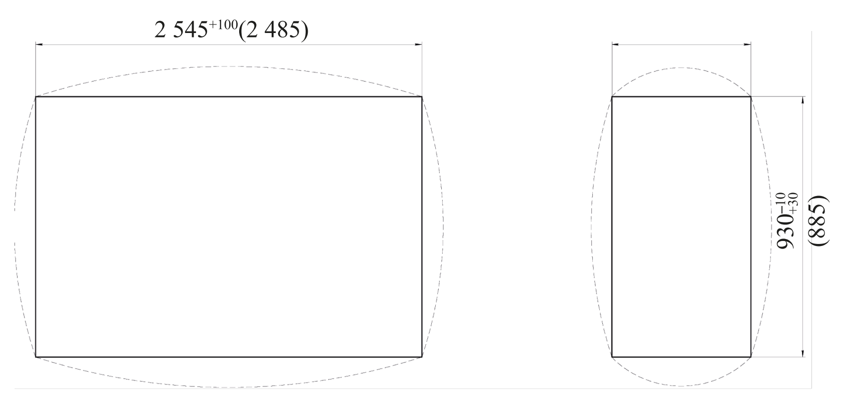


Рис. 1. Эскиз крупногабаритной поковки из сплава 1933

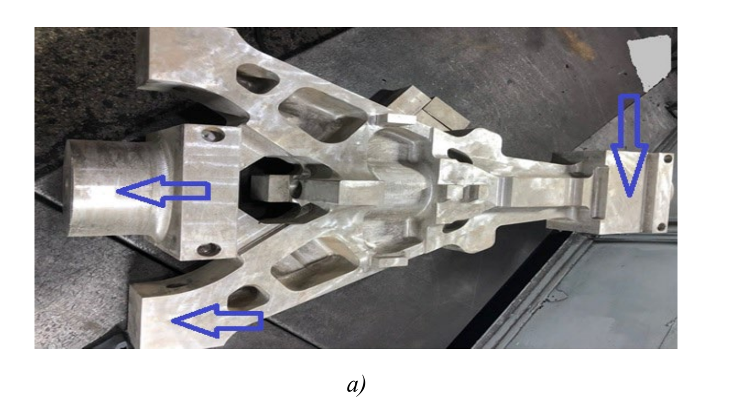
[1] ГОСТ 1497–84. *Металлы. Методы испытания на растяжение.* Москва: Стандартинформ; 2008. 26 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294852/4294852801.pdf (дата обращения: 29.04.2024).
[2] ГОСТ 9012–59. ИСО 410–82 *Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю.* Москва: Стандартинформ; 2008. 40 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294850/4294850482.pdf (дата обращения: 29.04.2024).

Таблица 1

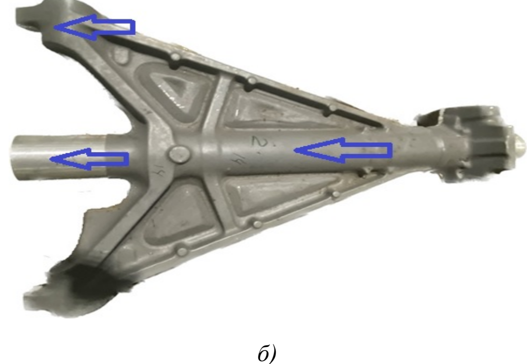
Химический состав исследуемых сплавов (масс., %)

Сплав	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Be	Al
1933	0,02	0,09	0,9	0,01	1,8	0,01	6,5	0,4	0,04	0,001	Осн.
В93пч	–	0,31	1,0	–	1,9	–	6,7	0,01	–	–	Осн.

На рис. 2 показаны детали, подвергаемые упрочняющей термической обработке (стрелками указаны места замера электропроводности сплава).



а)



б)

Рис. 2. Детали, подвергаемые термической обработке:
а — траверса из сплава 1933; *б* — рама амортизационной стойки из сплава В93пч

Результаты исследования. Исследования в состоянии поставки (после отжига) макроструктуры поковок и штампованных заготовок, изломов, выполненный ультразвуковой контроль не выявили недопустимых отклонений. Электропроводность сплава 1933 составляет 24,7 мСм/м, а для сплава В93пч — 23,5 мСм/м. На рис. 3 показана микроструктура сплава 1933 в состоянии поставки. Зеренная структура сплава не имеет ярко выраженного ориентированного характера.

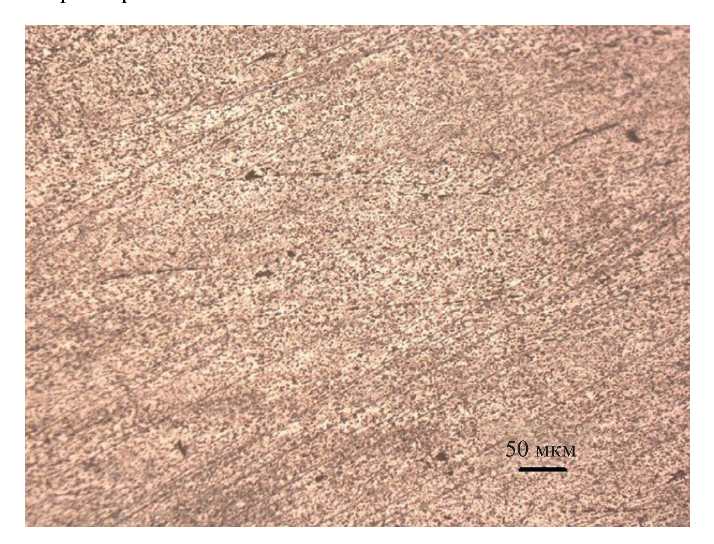


Рис. 3. Микроструктура сплава 1933 в состоянии поставки

Определены характеристики механических свойств на продольных и поперечных по ширине и поперечных по толщине образцах, которые изготавливались из поковки и штампованной заготовки. Термическая обработка образцов (типовой вариант) выполнялась по режимам: сплав 1933 — температура нагрева под закалку 470 °C, охлаждение в воде с температурой 75–85 °C, искусственное старение: 1 ступень — 110 °C (время выдержки 24 часа, охлаждение на воздухе), 2 ступень — 180 °C (время выдержки 10–12 часов, охлаждение на воздухе); сплав В93пч — температура нагрева под закалку 460 °C, время выдержки 180 минут, охлаждение в воде с температурой 75–85 °C, искусственное старение: 1 ступень — 120 °C (время выдержки — 8 часов, охлаждение на воздухе), 2 ступень — 170 °C (время выдержки — 8 часов, охлаждение на воздухе). Результаты исследований приведены в таблице 2. Из представленных данных следует, что значения получаемых после термической обработки образцов, вырезанных из поковок и штампованных заготовок, соответствуют требованиям нормативных документов (НД).

Таблица 2

Значения механических свойств термически обработанных образцов, вырезанных из поковки (сплав 1933) и штампованной заготовки (сплав В93пч)

Результаты механических свойств					Норма по НД			
Направление волокна	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	НВ	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ,%, не менее	НВ, не менее
Продольное	480/480	—/433	17,0/11,2	149/163	440–530/430–500	390–470	7,0/7,0	110
Поперечное по ширине	480/500	—/457	12,2/8,0		430–530/430–500	390–470	5,0/5,0	
Поперечное по толщине	490/470	–	8,1/3,5		420–500/430–500	–	3,0/3,0	

Примечание. В числителе — значения свойств для сплава 1933, в знаменателе — для сплава В93пч.

Технологический процесс изготовления рассматриваемых изделий является многостадийным, и после механической обработки упрочняющая термическая обработка проводится на крупногабаритных деталях со сложной геометрией. После термической обработки деталей по традиционным режимам было выявлено несоответствие показателей механических свойств НД. В этой связи исследован ряд режимов и вариантов термической обработки (таблица 3):

1 режим (1933) — типовой вариант термической обработки детали «траверса» из сплава 1933 по производственной инструкции;

2 режим (1933) — либо вариант повторной термической обработки, проводимой для исправления несоответствия уровня свойств после 1 режима (1933), либо вариант термической обработки вместо 1 режима (1933);

1 режим (В93) — типовой вариант термической обработки детали «рама» из сплава В93пч по производственной инструкции;

2 режим (В93) — либо вариант повторной термической обработки, проводимой для исправления несоответствия уровня свойств после 1 режима (В93), либо вариант термической обработки вместо 1 режима (В93).

Таблица 3

Режимы упрочняющей термической обработки деталей «траверса» из сплава 1933 и «рама» из сплава В93

Режим термической обработки	Закалка	Первая ступень старения	Вторая ступень старения
Режим№ 1 (1933)	T = 470 °C, температура начала отсчета — 455 °C, время выдержки — 250 мин., среда охлаждения — вода, $t_{воды}$ = 75–85 °C	T = 110 °C, время выдержки — 24 ч., среда охлаждения — воздух	T = 180 °C, время выдержки — 10–12 ч., среда охлаждения — воздух
Режим № 2 (1933)	T = 470 °C, температура начала отсчета — 455 °C, время выдержки — 250 мин., среда охлаждения — вода, $t_{воды}$ = 75–85 °C	T = 110 °C, время выдержки — 12 ч., среда охлаждения — воздух	T = 180 °C, время выдержки — 6 ч., среда охлаждения — воздух
Режим № 1 (В93)	T = 460 °C, температура начала отсчета — 445 °C, время выдержки — 180 мин., среда охлаждения — вода, $t_{воды}$ = 75–85 °C	T = 120 °C, время выдержки 8 ч., среда охлаждения — воздух	T = 170 °C, время выдержки — 8 ч., среда охлаждения — воздух
Режим № 2 (В93)	T = 460 °C, температура начала отсчета — 445 °C, время выдержки — 180 мин., среда охлаждения — вода, $t_{воды}$ = 75–85 °C	T = 120 °C, время выдержки — 10 ч., среда охлаждения — воздух	T = 175 °C, время выдержки — 10 ч., среда охлаждения — воздух

В таблице 4 приведены результаты оценки механических свойств после исследуемых режимов и вариантов термической обработки для сплава 1933. Режим № 2 (1933), представленный в таблице 3, позволяет получить требуемые механические свойства, соответствующие НД, также данный режим можно использовать в качестве повторной термической обработки для устранения негативных результатов после обработки по режиму № 1 (1933) — недопустимо низкий уровень прочности сплава в продольном и поперечном (по ширине) направлении волокна.

Таблица 4

Результаты испытаний механических свойств после упрочняющей термической обработки детали «траверса» из сплава 1933

Режим термической обработки	Механические свойства			
	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	НВ
Продольное направление волокна				
Режим № 1 (1933)	430	370	10,1	129
Режим № 2 (1933) (в варианте повторной обработки)	480	430	12,2	–
Режим № 2 (1933) (в варианте замены режима № 1)	480	400	16,1	138
Требования НД	440–530	380–480	Не менее 7,0	Не менее 110
Поперечное направление волокна (по ширине)				
Режим № 1 (1933)	420	370	13,2	129
Режим № 2 (1933) (в варианте повторной обработки)	470	450	11,3	–
Режим № 2 (1933) (в варианте замены режима № 1)	480	410	11,1	138
Требования НД	430–530	370–470	Не менее 4,0	Не менее 110
Поперечное направление волокна (по толщине)				
Режим № 1 (1933)	430	–	16,3	129
Режим № 2 (1933) (в варианте повторной обработки)	480	–	16,2	–
Режим № 2 (1933) (в варианте замены режима № 1)	460	–	10,4	138
Требования НД	420–500	–	Не менее 2,5	Не менее 110

В таблице 5 приведены результаты оценки механических свойств после исследуемых режимов и вариантов термической обработки для сплава В93пч.

Таблица 5

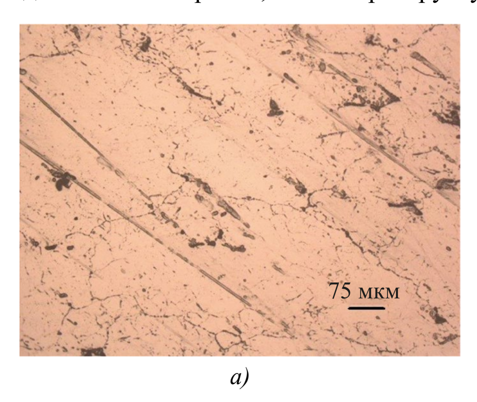
Результаты испытаний механических свойств после упрочняющей термической обработки детали «рама» из сплава В93пч

Режим термической обработки	Механические свойства		
	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ
Продольное направление волокна			
Режим № 1 (В93)	510	12,4	163
Режим № 2 (В93) (в варианте повторной обработки)	450	15,5	121
Режим № 2 (В93) (в варианте замены режима № 1)	480	13,0	143
Требования НД	440–500	Не менее 7,0	Не менее 110
Поперечное направление волокна (по ширине)			
Режим № 1 (В93)	510	7,2	163
Режим № 2 (В93) (в варианте повторной обработки)	440	13,5	121
Режим № 2 (В93) (в варианте замены режима № 1)	480	8,0	143
Требования НД	430–500	Не менее 4,0	Не менее 110
Поперечное направление волокна (по толщине)			
Режим №1 (В93)	490	4,0	163
Режим № 2 (В93) (в варианте повторной обработки)	431	9,0	121
Режим № 2 (В93) (в варианте замены режима № 1)	480	8,0	143
Требования НД	420–500	Не менее 3,0	Не менее 110

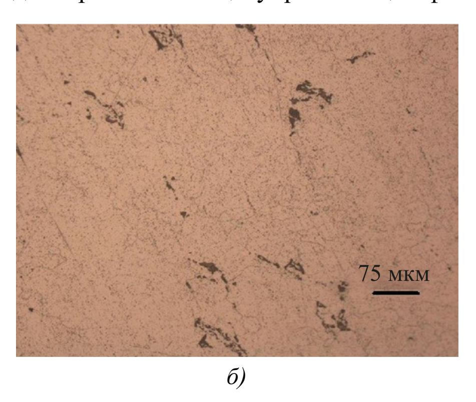
Как видно по представленным данным, режим № 1 (В93) не обеспечивает требуемого уровня прочностных свойств в продольном и поперечном (по ширине) направлениях волокна детали. Уровень свойств завышен. В то же время режим № 2 (В93) позволяет достигать необходимых значений свойств при его реализации как в варианте повторной обработки, так и в варианте замены режима № 1.

Таким образом, наиболее чувствительными к влиянию режимов термической обработки в крупногабаритных изделиях из сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu являются продольное и поперечное (по ширине) направления волокна. Достигнуть требуемого уровня прочностных свойств возможно коррекцией режимов старения сплавов — либо в сторону сокращения (сплав 1933), либо в сторону увеличения (сплав В93пч) длительности.

Выполненные микроструктурные исследования подтвердили отсутствие признаков пережога после закалки при обработке по всем режимам и вариантам термической обработки. На рис. 4 представлена микроструктура исследуемых сплавов после упрочняющей термической обработки по режимам № 2 (1933) и № 2 (В93пч) (в вариантах замены режима № 1). Поскольку при термической обработке сплава В93пч использовано существенно более длительное старение, то в микроструктуре выявляются дисперсные частицы упрочняющих фаз.



а)



б)

Рис. 4. Структура сплавов после упрочняющей термообработки по режимам:
а — режим № 2 (1933); *б* — режим № 2 (В93пч) (в вариантах замены режима № 1)

Авторами выполнены исследования электропроводности сплавов 1933 и В93пч после различных режимов и вариантов термической обработки. Результаты исследования позволяли оценивать по методике ТУ 1-804-475-2008. П.1.22 степень распада пересыщенного твердого раствора при различных режимах старения, а также сопротивляемость сплава коррозионному растрескиванию. Согласно требованиям НД, для подтверждения удовлетворительной коррозионной стойкости на полуфабрикатах из сплава 1933 в состоянии Т2 и Т3 показатель электропроводности (ϒ) должен быть не менее 22,5 мСм/м в состоянии Т2 и не менее 23,5 мСм/м в состоянии Т3; для сплава В93пч показатель электропроводности должен лежать в пределах 21–25 мСм/м. Измерения электропроводности проводились прибором на наиболее массивных участках детали (указаны стрелками на рис. 2). В состоянии поставки электропроводность сплава В93пч составляла 22,7–23,8 мСм/м. Результаты измерения представлены в таблице 6.

Таблица 6

Значения электропроводности на различных этапах упрочняющей термической обработки сплавов 1933 и В93пч

Режим термической обработки	Состояния заготовки детали в процессе термообработки	Электропроводность, мСм/м
Режим № 1 (1933) Режим № 1 (В95)	После закалки	18,5–18,6
	После 1 стадии старения	19,6–19,8
	После 2 стадии старения	25,1–25,9 23,5–23,6
Режим № 2 (1933) Режим № 2 (В95) (в варианте повторной обработки)	После закалки	18,5–18,6
	После 1 стадии старения	19,6–19,7
	После 2 стадии старения	25,1–25,7 24,2–25,0
Режим № 2 (1933) Режим № 2 (В95) (в варианте замены режима № 1)	После закалки	18,5–18,7
	После 1 стадии старения	19,6–19,7
	После 2 стадии старения	25,2–25,7 24,3–25,0

Как следует из приведенных данных, по мере развития процессов распада пересыщенного твердого раствора при старении имеет место увеличение электропроводности сплава, что связано с уменьшением пересыщенности кристаллической решетки атомами легирующих элементов. При этом несмотря на сокращенные длительности старения на первой и второй стадиях при реализации режима № 2 (1933) значения электропроводности практически совпадают со значениями после режима № 1 (1933). Это свидетельствует о достаточно высокой степени распада пересыщенного твердого раствора на стадиях старения при обработке по режиму № 2 (1933). Значения электропроводности сплава подтверждают его достаточную сопротивляемость КР. Электропроводность сплава В93пч также соответствует требованиям НД.

Обсуждение и заключение. При проведении упрочняющей термической обработки деталей самолетов SSJ-NEW и ТУ 214, изготавливаемых из крупногабаритных поковок сплава 1933 и штампованных заготовок сплава В93пч, выявлены случаи несоответствия прочностных свойств в продольном и поперечном (по ширине) направлениях волокна деталей.

Показано, что в зависимости от конфигурации и габаритов деталей уровни требуемых характеристик механических свойств длительности ступеней старения должны назначаться дифференцированно. Предложены режимы и варианты термической обработки деталей, использующие сокращенное (для сплава 1933) или увеличенное (для сплава В95пч) время выдержки при ступенях старения, позволяющее обеспечить необходимый уровень механических свойств и сопротивляемости коррозионному растрескиванию крупногабаритных изделий.

Проведенные исследования влияния реализации стадий термической обработки на формирование уровня электропроводности сплава 1933 подтверждают достижение достаточного уровня распада пересыщенного твердого раствора при предлагаемой сокращенной продолжительности старения для сплава 1933, что обеспечивает необходимые уровни прочности и сопротивления коррозии. Увеличенная длительность старения сплава В93пч обеспечивает достаточный уровень его электропроводности.

Список литературы / References

1. *Машиностроение. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы.* Энциклопедия. В 40 т. Т. II–3. Москва: Машиностроение; 2001. 880 с.

Mechanical Engineering. Non-Ferrous Metals and Alloys. Composite Metal Materials. Encyclopedia. In 40 vol. Vol. II–3. Moscow: Mashinostroenie; 2001. 880 p. (In Russ.)

2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года. *Авиационные материалы и технологии.* 2012;(S):7–17.

Kablov EN. Strategical Areas of Developing Materials and Their Processing Technologies for the Period up to 2030. *Aviation Materials and Technologies.* 2012;(S):7–17. (In Russ.)

3. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Оглодкова Ю.С., Оглодков М.С. Опыт и перспективы применения алюминий-литиевых сплавов в изделиях авиационной и космической техники. *Металлург.* 2021;(1):62–70. URL: https://library.bmstu.ru/Publications/Home/AuthorPublications/c00e1744-db59-4d2f-9f79-1e9e757d5105 (дата обращения: 29.04.2024).

Kablov EN, Antipov VV, Odolodkova YuS, Odolodkov MS. Experience and Application Prospects of Aluminum-Lithium Alloys in Aircraft and Space Technology. *Metallurg.* 2021;(1):62–70. URL: https://library.bmstu.ru/Publications/Home/AuthorPublications/c00e1744-db59-4d2f-9f79-1e9e757d5105 (accessed: 29.04.2024). (In Russ.)

4. Фридляндер И.Н. *Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов*. 2-е изд. Москва: Наука; 2006. 275 с. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/fridlyander_vospominaniya_2006/p12/ (дата обращения: 29.04.2024).

Fridlyander IN. *Memories of the Creation of Aerospace and Nuclear Technology from Aluminum Alloys*. 2-nd ed. Moscow: Nauka; 2006. 275 p. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/fridlyander_vospominaniya_2006/p12/ (accessed: 29.04.2024). (In Russ.)

5. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы. *Авиационные материалы и технологии.* 2012;(S):167–182.

Antipov VV, Senatorova OG, Tkachenko EA, Vakhromov PO. Aluminium Wrought Alloys. *Aviation Materials and Technologies.* 2012;(S):167–182. (In Russ.)

6. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В., Попов В.И., Блинова Н.Е. Разработка, освоение и применение особопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu-Zr для авиационной и ракетной техники. В: *Труды международной научно-технической конференции «Развитие фундаментальных основ материаловедения легких сплавов и композиционных материалов на их основе для создания изделий аэрокосмической и атомной техники».* Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»; 2013. С. 51.

Antipov VV, Senatorova OG, Sidelnikov VV, Popov VI, Blinova NE. Development and Application of High-Strength Alloys of the Al-Zn-Mg-Cu-Zr System for Aviation and Rocket Technology. In: *Proceedings of the*

International scientific and technical conference "Development of the fundamentals of materials science of light alloys and composite materials based on them for the creation of aerospace and nuclear engineering products". Moscow: All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials of the National Research Center "Kurchatov Institute"; 2013. P. 51. (In Russ.)

7. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов — гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники. *Авиационные материалы и технологии.* 2001:(1);3–8.

Kablov EN. Quality Control of Materials is a Guarantee of the Safety of Aviation Equipment Operation. *Aviation Materials and Technologies.* 2001:(1);3–8. (In Russ.)

8. Сенаторов О.Г., Антипов В.В., Бронз А.В., Сомов А.В., Серебренников Н.Ю. Высокопрочные и сверхпрочные сплавы традиционной системы Al-Zn-Mg-Cu, их роль в технике и возможности развития. *Технология легких сплавов.* 2016;4:43–49.

Senatorov OG, Antipov VV, Bronz AV, Somov AV, Serebrennikova NYu. High-Strength and Super High-Strength Conventional Al-Zn-Mg-Cu System-Based Alloys, Their Role in Engineering and Possibility of Development. *Tekhnologiya legkikh splavov.* 2016;4:43–49. (In Russ.)

9. Kai Wen, Yunqiang Fan, Guojun Wang, Longbin Jin, Xiwu Li, Zhihui Li, et al. Aging Behavior and Precipitate Characterization of a High Zn-Containing Al–Zn–Mg–Cu Alloy with Various Tempers. *Materials & Design.* 2016;101:16–23. http://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.150

10. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». *Авиационные материалы и технологии*. 2015;1(34):3–33. URL: https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2015/2015_1_1_1.pdf (дата обращения: 29.04.2024).

Kablov EN. Innovative Developments of FSUE "VIAM" SSC of RF on Realization of "Strategic Directions of the Development of Materials and Technologies of Their Processing for the Period until 2030". *Aviation Materials and Technologies*. 2015;1(34):3–33. URL: https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2015/2015_1_1_1.pdf (accessed: 29.04.2024). (In Russ.)

11. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники. *Авиационные материалы и технологии.* 2017;(S):186–194. https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194

Antipov VV. Prospects for Development of Aluminium, Magnesium and Titanium Alloys for Aerospace Engineering. *Aviation Materials and Technologies.* 2017;(S):186–194. https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194 (In Russ.)

12. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки. *Вестник Российской академии наук.* 2020;90(4):331–334. https://doi.org/10.31857/S0869587320040052

Kablov EN. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences.* 2020;90(4):331–334. https://doi.org/10.31857/S0869587320040052 (In Russ.)

13. Фридляндер И.Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе. *Металловедение и термическая обработка металлов.* 2002;(7):24–29.

Fridlyander IN. Modern Aluminum, Magnesium Alloys and Composite Materials Based on Them. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov.* 2002;(7):24–29. (In Russ.)

14. Нечайкина Т.А., Блинова Н.Е., Иванов А.Л., Козлова О.Ю., Кожекин А.Е. Исследование влияния режимов гомогенизации и закалки на структуру и механические свойства раскатных колец из сплава В95оч-Т2. *Труды ВИАМ.* 2018;10(70):27–36. https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-10-27-36

Nechaykina TA, Blinova NE, Ivanov AL, Kozlova OYu, Kozhekin AE. Research of the Effect of Homogenization and Quench Hardening Modes on the Structure and Mechanical Properties of Retail Rings From Alloy B95o.ch.-T2. *Proceedings of VIAM.* 2018;10(70):27–36. https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-10-27-36 (In Russ.)

15. Сенаторова О.Г., Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Иванов А.Л., Попов В.И. Исследование структуры и свойств плиты толщиной 80 мм из сплава В95 пчТ2. *Технология легких сплавов.* 2016;(2):37–42.

Senatorova OG, Serebrennikova NYu, Antipov VV, Ivanov AL, Popov VI. Investigation of the Structure and Properties of an 80 mm Thick Plate Made of B95 p.chT2 Alloy. *Tekhnologiya legkikh splavov.* 2016;(2):37–42. (In Russ.)

16. Нечайкина Т.А., Оглодков М.С., Иванов А.Л., Козлова О.Ю., Яковлев С.И., Шляпников М.А. Особенности закалки широких обшивочных плакированных листов из алюминиевого сплава В95пч на линии непрерывной термической обработки. *Труды ВИАМ.* 2021;(11(105)):25–33. https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-11-25-33

Nechaikina TA, Oglodkov MS, Ivanov AL, Kozlova OYu, Yakovlev SI, Shlyapnikov MA. Features of Quenching of Wide Cladding Clad Sheets Made of Aluminum Alloy B95p.ch on a Continuous Heat Treatment Line. *Proceedings of VIAM.* 2021;(11(105)):25–33. https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-11-25-33 (In Russ.)

17. Ovsyannikov BV. Beware of Grain Refinement. *Materials Science Forum.* 2014;794–796:143–148. http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.794-796.143

18. Леонов В.В., Никифоров А.Г., Ковалева А.А. Выявление корреляционных взаимосвязей между физическими свойствами алюминиевых сплавов. *Фундаментальные исследования.* 2017;(7):44–48. URL: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41582 (дата обращения: 29.04.2024).

Leonov VV, Nikiforov AG, Kovaleva AA. Identification of Correlations between Physical Properties of Aluminum Alloys. *Fundamental research.* 2017;(7):44–48. URL: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41582 (accessed: 29.04.2024). (In Russ.)

Об авторах:

Владимир Сергеевич Муратов, доктор технических наук, профессор кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов Самарского государственного технического университета (443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244), SPIN-код: 1341-1718, ORCID, ResearcherID, muratov1956@mail.ru

Николай Сергеевич Якимов, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «Авиаагрегат» (443009, Российская Федерация, г. Самара, Заводское шоссе, 55), SPIN-код: 7371-3706, ORCID, ResearcherID, andrej.bakin2013@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

В.С. Муратов: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Н.С. Якимов: формулирование основной концепции, целей и задач исследования, проведение испытаний, подготовка текста, формулирование выводов.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Vladimir S. Muratov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials, Samara State Technical University (244, Molodogvardeyskaya St., Samara, 443100, RF), SPIN-code: 1341–1718, ORCID, ResearcherID, muratov1956@mail.ru

Nikolai S. Yakimov, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer of Aviaagregat JSC (55, Zavodskoe highway, Samara, 443009, RF), SPIN-code: 7371-3706, ORCID, ResearcherID, andrej.bakin2013@yandex.ru

Claimed Contributorship:

VS Muratov: academic advising, research results analysis, text revision, conclusions correction.

NS Yakimov: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, conducting tests, text preparation, conclusions formulation.

Conflict of Interest Statement: **the authors do not have any conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 29.05.2024
Поступила после рецензирования / Revised 13.06.2024
Принята к публикации / Accepted 17.06.2024